

# 项目一 直流电机

## 【学习目标】

1. 熟悉直流电机的结构。
2. 掌握直流电机的工作原理。
3. 会进行直流电机绝缘电阻的测量、绕组直流电阻的测量及转速测量。
4. 了解直流电机的换向、调速及制动。
5. 能理解直流电机的电枢反应影响。

## 【项目描述】

本项目为直流电机的基本知识，是后续直流电机电力拖动章节的基础，让学生熟练掌握本章节的内容。

## 【学习任务】

## 任务一 直流电机的工作原理

直流电机是电能和机械能相互转换的旋转电机之一。将机械能转换为直流电能的电机称为直流发电机；将直流电能转换为机械能的电机称为直流电动机。直流发电机可作为各种直流电源；直流电动机具有宽广的调速范围，平滑的调速特性，较强的过载能力和较大的启动、制动转矩，广泛应用于对启动和调速要求较高的生产机械，如电力机车、内燃机车、工矿机车、城市电车、电梯、轧铜机、卷扬机、大型机床等的拖动电机。

### 一、直流电机模型

图 1-1 所示为一台直流电机简单的物理模型图。其中，固定部分有磁铁，这里称作主磁极；固定部分还有电刷。转动部分有环形铁芯和绕在环形铁芯上的绕组。（其中 2 个小圆圈是为了方便表示该位置上的导体电势或电流的方向而设置的）。

该图表示一台最简单的两极直流电机模型，它的固定部分（定子）上，装设了一对直流

励磁的静止的主磁极 N 和 S，在旋转部分（转子）上装设了电枢铁芯。定子与转子之间有一气隙。在电枢铁芯上放置了两根导体连成的电枢线圈，线圈的首端和末端分别连到两个圆弧形铜片上，此铜片称为换向片。换向片之间互相绝缘，由换向片构成的整体称为换向器。换向器固定在转轴上，换向片与转轴之间亦互相绝缘。在换向片上放置着一对固定不动的电刷 A 和 B，当电枢旋转时，电枢线圈通过换向片和电刷与外电路接通。

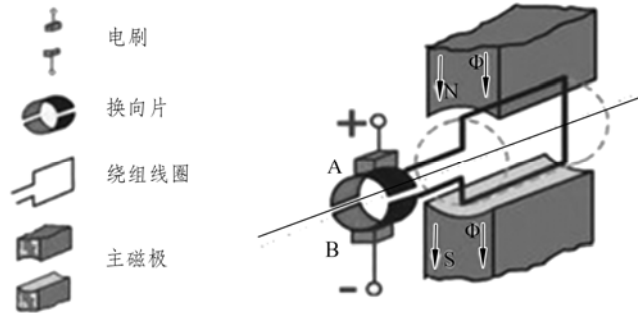


图 1-1 直流电机模型

## 二、直流发电机工作原理

直流发电机是利用电磁感应原理将机械能转变成电能的旋转机械，输入的是机械能，输出的是电能。下面就根据图 1-2 分析该电路系统、磁路系统中的电磁感应过程。

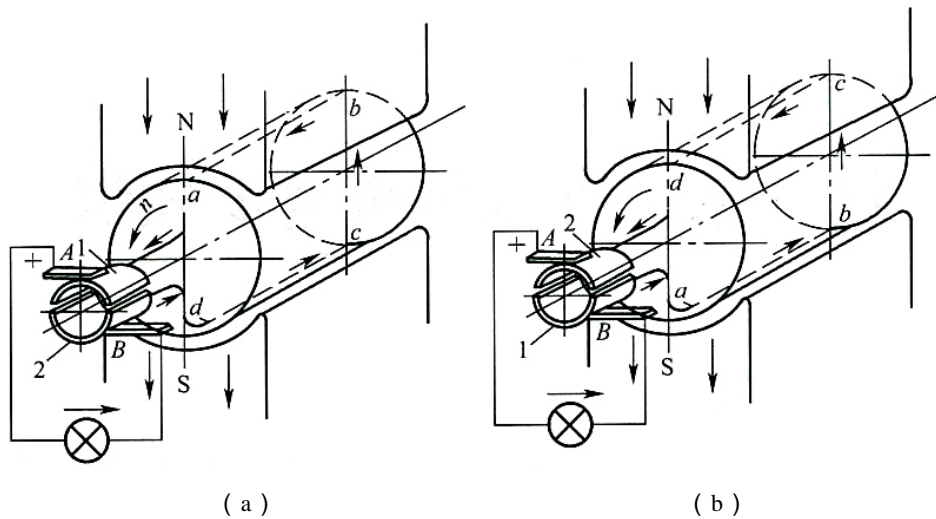


图 1-2 直流发电机工作原理

外电路：A +（电刷）→导线→负载（灯泡）→导线→B -（电刷）。

内电路：B -（电刷）→换向器 1→ab（有效边）→连接导线 bc→cd（有效边）→换向器 2→A +（电刷）。转动 180°后，换向器及两有效边位置对调，电刷位置固定，极性不变。

磁路：N 极（定子上）→空气间隙（定子与转子间的间隙上部）→线圈 abcd（转子铁芯上）→空气间隙（定子与转子间的间隙下部）→S 极（定子上）。

电磁感应：线圈 abcd 受原动力（外力）逆时针转动，切割由 N、S 极磁路在空气隙产生的磁通，根据右手定则，在 A 形成感应电势“+”，在 B 形成感应电势“-”。

### 1. 产生感应电势

当直流发电机的电枢被原动机拖动，并以恒速  $v$  逆时针方向旋转时，如图 1-2 (a) 所示，线圈两个有效边 ab 和 cd 将切割磁力线而感应产生电动势  $e$ 。其方向由右手定则确定，导体 ab 位于 N 极下，导体 cd 位于 S 极下，感应电动势方向分别为  $b \rightarrow a$ ， $d \rightarrow c$ 。若接通外电路，则电流从换向片 1  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  负载  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  换向片 2，即电流从电刷 A 流出，具有正极性，用“+”表示；从电刷 B 流入，具有负极性，用“-”表示。

当电枢转过  $90^\circ$  时，线圈有效边 ab 和 cd 转到 N、S 极之间的几何中心线上，此处磁密为零，故这一瞬时感应电动势  $e$  为零。

当电枢转过  $180^\circ$  时，导体 ab 和 cd 及换向片 1、2 位置互换，如图 1-2 (b) 所示。此时，导体 ab 位于 S 极下，导体 cd 位于 N 极下，线圈两个有效边产生的感应电动势方向分别为  $a \rightarrow b$ ， $c \rightarrow d$ ，电动势方向恰好与开始瞬时相反。外电路中流过的电流从换向片 2  $\rightarrow$  A  $\rightarrow$  负载  $\rightarrow$  B  $\rightarrow$  换向片 1。由此可见，电刷 A 始终与转到 N 极下的有效边所连接的换向片接触，而电刷 B 始终与转到 S 极下的有效边所连接的换向片接触，故电刷的极性始终不变，即 A 为“+”，B 为“-”。

设导体中（一有效边）的感应电势为  $e$ ，则线圈（两有效边）感应电势为  $2e$ 。感应电势  $e$  的瞬时值为：

$$e = BvL \quad (\text{V}) \quad (1-1)$$

式中  $B$ ——导体所处位置的磁密 (T)；

$v$ ——导体的线速度 (m/s)；

$L$ ——导体的有效长度 (m)。

#### 1) 内部电路（线圈内部）感应电动势的交流变化（一周期）

设电机有效边  $L =$  常数， $v =$  常数，则感应电势  $e \propto B$ ，即导体电动势随时间的变化规律与气隙磁密的分布规律相同；而 ab、cd 两有效边随着转动在 N、S 极下周期变化，故内部电路（线圈）感应电势的波形如图 1-3 所示。

#### 2) 外部电路（电刷两端）呈现直流变化（一周期）

转子上的换向器通过与定子上的电刷机械滑动实现机械换向，把内部电路（线圈）的交流电势转换成外部电路（电刷两端）的直流电势输出，其波形图如 1-4 所示。

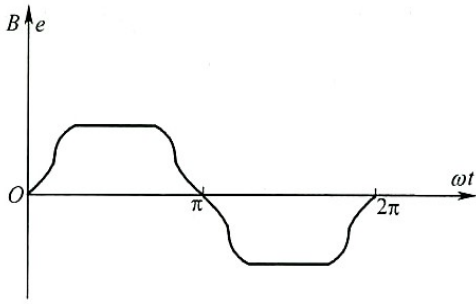


图 1-3 线圈内电势波形

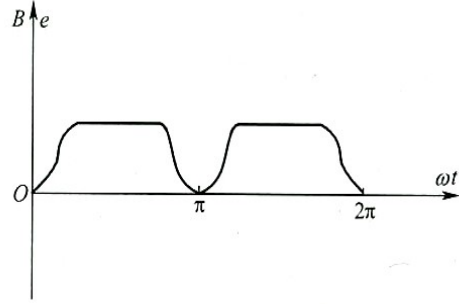


图 1-4 电刷两端电势波形

## 2. 感应电势与线圈数量的关系

线圈的多少决定了感应电势的大小，图 1-4 所示是一个线圈（两个有效边）时直流发电机输出的电势波形。如果是多个线圈，只要把分布在转子上的多个线圈产生的电势进行叠加，即可得到输出的电势波形。但是这个叠加并不是简单地加起来，因为各个线圈在转子上布置的位置不一样，从图 1-5 及图 1-6 可以看出线圈数量不同时的感应电势波形及波形是如何进行叠加的。

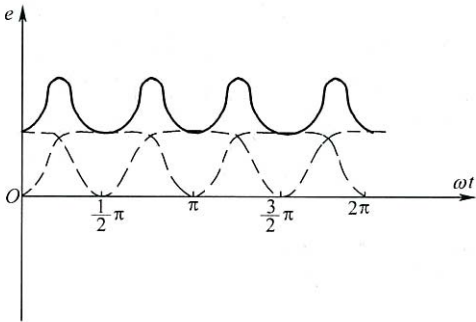


图 1-5 两个线圈换向后电刷两端电势波形

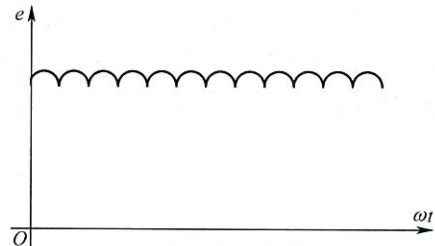


图 1-6 多个线圈换向后电刷两端电势波形

## 3. 在电磁感应中实现能量转换

直流发电机是在电磁感应中实现把电能转换成机械能，其关键是利用左手定则与右手定则进行分析。

(1) 右手定则。外力拖动转子上的线圈转动，切割定子 N、S 磁路在气隙产生的磁通，线圈中产生的感应电势的方向用右手定则判断。线圈中的交流电势通过换向器与电刷的机械换向，在电刷两端输出直流电势。

(2) 左手定则。线圈产生的感应电势在发电机内部电路产生电流回路，用左手定则判断出线圈产生阻力矩的方向。

(3) 当外力拖动转子转动的力矩大于阻力矩时，便能源源不断地在电刷两端输出直流电动势，从而实现了把机械能转换成电能。

### 三、直流电动机工作原理

直流电动机是将电能转变成机械能的旋转机械。直流电动机的结构与直流发电机相同，不同的是电刷 A、B 外接一直流电源，而此直流电源作为输入；转子产生电磁力矩作为输出来拖动负载。即直流电动机输入的是电能，输出的是机械能，这跟直流发电机刚好是相反的。

#### 1. 产生电磁力矩

如图 1-7 所示，瞬时电流的流向为  $+ \rightarrow A \rightarrow$  换向片 1  $\rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow$  换向片 2  $\rightarrow B \rightarrow -$ 。根据电磁力定律，载导体  $ab$ 、 $cd$ （这两个边是有效边）都将受到电磁力  $f$  的作用，其大小为：

$$f = BLi \quad (1-2)$$

式中  $B$ ——导体所处位置的磁密 ( T )；

$L$ ——导体的有效长度 ( m )；

$i$ ——导体流过的电流 ( A )。

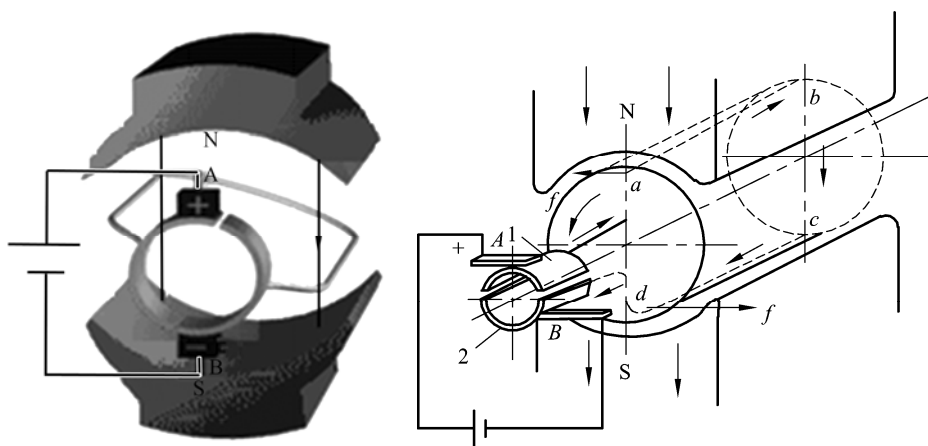


图 1-7 直流电动机工作原理图

导体所受电磁力的方向用左手定则确定。在此瞬时， $ab$  位于 N 极下，受力方向从右向左； $cd$  位于 S 极下，受力方向从左向右，电磁力对转轴便形成一电磁转矩  $T$ 。在  $T$  的作用下，电枢便逆时针旋转起来。

当电枢转过  $90^\circ$  时，电刷不与换向片接触，而与换向片间的绝缘片相接触，此时线圈中没有电流流过， $i = 0$ ， $f = 0$ ，故电磁转矩  $T = 0$ 。但由于机械惯性的作用，电枢仍能转过一个角度，电刷 A、B 又将分别与换向片 2、1 接触，线圈中又有电流  $i$  流过。此时，导体  $ab$ 、 $cd$  中电流改变了方向，即为  $b \rightarrow a$ ， $d \rightarrow c$ ，且导体  $ab$  转到 S 极下， $ab$  所受的电磁力  $f$  方向从左向右， $cd$  转到 N 极下， $cd$  所受的电磁力  $f$  方向从右向左。因此，线圈仍然受到逆时针方向电磁转矩的作用，所以电枢始终保持同一方向旋转。

#### 2. 在电磁感应中实现能量转换

(1) 左手定则。在直流电动机中，电刷两端虽然加的是直流电源，但在电刷和换向器的滑动形成的机械换向作用下，线圈内部却变成了交流电，利用左手定则判断电磁力方向可知，此时产生了单方向的电磁转矩，驱动电机持续旋转。

(2) 右手定则。旋转的线圈中也将感应产生电动势  $e$ ，通过右手定则判断其产生的感应电动势方向可知，此感应电动势  $e$  产生的电流与线圈中电流方向相反，故称为反电动势。

(3) 直流电动机若要维持继续旋转，外加电压就必须高于反电动势，才能不断地克服反电动势而流入电流，从而实现将电能转换成为机械能。

#### 四、直流电机的可逆原理

直流发电机和直流电动机在结构上是完全相同的，每一台电机都既可以作为发电机运行，又可以作为电动机运行，这一性质称为直流电机的可逆原理。电机的实际运行方式由外施条件决定，若在电机轴上施加机械能使电枢转动，通过电机把机械能转换成电能，则电机作为发电机运行；若在电枢线圈中输入电能，通过电机把电能转换成机械能，则电机作为电动机运行。直流发电机和直流电动机并不是两种不同的电机，而是同一电机的两种不同运行方式。

表 1-1 对直流电机在两种不同运行方式下的相关物理量的性质关系进行了比较，从中可以看出二者存在的不同。

表 1-1 直流电机两种不同运行方式比较

运行方式	$E$ 与 $I_a$ 的方向	$E$ 的作用	$T$ 的性质	转矩之间关系
发电机	同向	电源电动势	阻转矩	$T_1 = T + T_0$
电动机	反向	反电动势	驱动转矩	$T = T_L + T_0$

注： $I_a$ ——电枢电流； $T_1$ ——输入转矩； $T_L$ ——负载转矩； $T_0$ ——电机空载损耗转矩。

## 任务二 直流电机的结构

### 一、直流电机的基本结构

直流电机由静止的定子和旋转的转子两大部分组成，在定子和转子之间有一定大小的间隙，称为气隙，如图 1-8 所示。

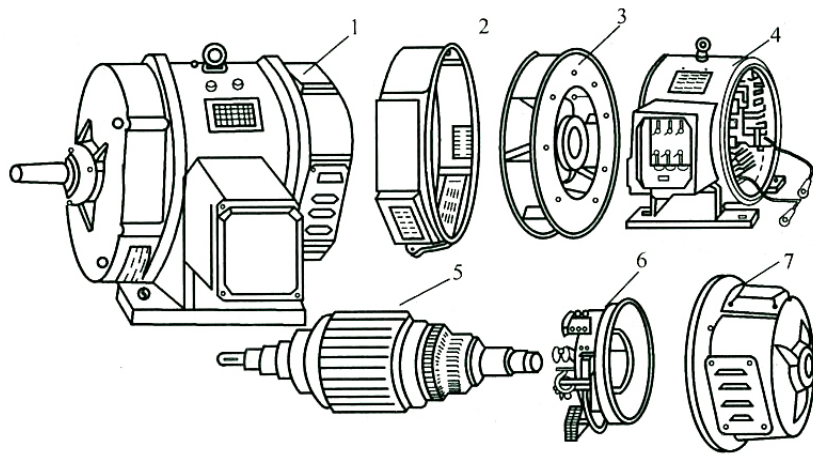


图 1-8 直流电机结构

1—直流电机总成；2—后端盖；3—通风器；4—定子总成；  
5—电枢总成（转子）；6—电刷装置；7—前端盖

## 1. 定 子

直流电机定子的作用是产生磁场和作为电机的机械支撑，主要由机座、主磁极、换向极和电刷装置等组成。

### 1) 机 座

机座有两个作用：一是作为电机磁路的一部分；二是用来安装主磁极、换向极和端盖等。机座通常为铸钢件，也有采用钢板焊接而成的。对于换向要求较高的电机，还可以采用叠片结构的机座。

### 2) 主磁极

主磁极是一个电磁铁，由主极铁芯和主极绕组两部分组成，如图 1-9 所示。主极铁芯一般用 1~1.5 mm 厚的薄钢板冲片叠压后再用铆钉铆紧成一个整体。小型电机的主极绕组用绝缘铜线（或铝线）绕制而成；大中型电机主极绕组用扁铜线绕制并进行绝缘处理，然后套在主极铁芯外面。最后，整个主磁极用螺钉固定在机座内壁。

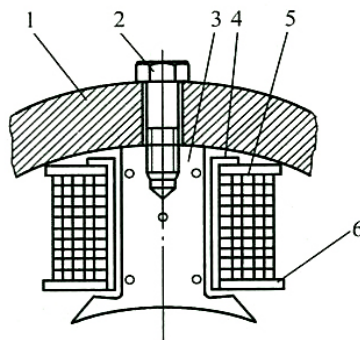


图 1-9 主磁极

1—机座；2—主极铆钉；3—主极铁芯；4—框架；5—主极绕组；6—绝缘垫衬

### 3) 换向极

如图 1-10 所示,换向极又称为附加极,它装在两个主极之间,用来改善直流电机的换向。换向极由换向极铁芯和换向极绕组构成。换向极铁芯大多用整块钢加工而成。但在整流电源供电的功率较大的电机中,为了更好地改善电机的换向,换向极铁芯也采用叠片结构。换向极绕组与主极绕组一样,也是用圆铜线或扁铜线绕制而成,经绝缘处理后套在换向极铁芯上,最后用螺钉将换向极固定在机座内壁。

对换向极性作这样的要求:发电机运行时,换向极极性与旋转方向的下一个主极极性相同;电动机运行时,换向极极性与发电机的相反。

换向极的作用:加装换向极,串接到电枢回路中,并使换向极的磁场方向与电枢磁场方向相反,用换向极磁场抵消(实际上不能完全抵消,只是削弱了)电枢磁场,保证定子磁场不发生太大的畸变,保证电机换向。

### 4) 电刷装置

电刷装置的作用是通过电刷与换向器表面的滑动接触,把转动的电枢绕组与外电路相连。

电刷装置一般由电刷、刷握、刷杆、刷杆座等部分组成,如图 1-11 所示。电刷一般用石墨粉压制而成。电刷放在刷握内,用弹簧压紧在换向器上,刷握固定在刷杆上,刷杆装在刷杆座上,成为一个整体部件。

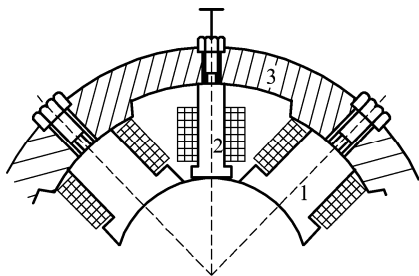


图 1-10 换向极

1—磁极；2—换向极；3—磁轭

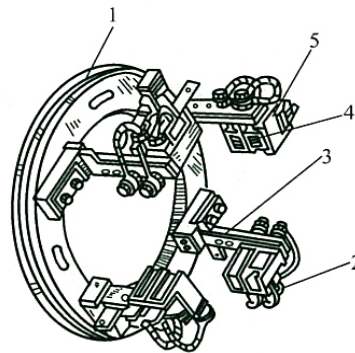


图 1-11 电刷装置

1—刷杆座；2—弹簧；3—刷杆；4—电刷；5—刷握

## 2. 转 子

直流电机的转子又称为电枢,主要由转轴、电枢铁芯、电枢绕组和换向器等组成。

### 1) 转 轴

转轴的作用是用来传递转矩,一般用合金钢锻压而成。



## 2) 电枢铁芯

电枢铁芯有两个作用：一是作为电机磁路的主要部分；二是用来嵌放电枢绕组。电枢铁芯和主极磁场之间存在相对运动，为了减小铁损，一般用 0.5 mm 厚的电工钢片冲制叠压而成，电枢铁芯固定在转子支架或转轴上。电枢铁芯冲片如图 1-12 所示，沿铁芯外圈均匀地分布着电枢槽，在槽内嵌放电枢绕组。

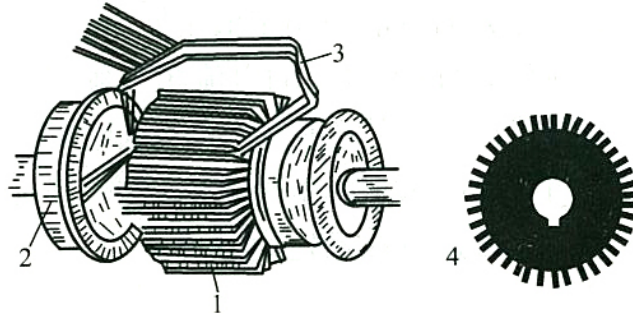


图 1-12 电枢结构及铁芯冲片

1—电枢铁芯；2—换向器；3—线圈绕组；4—铁芯冲片

## 3) 电枢绕组

电枢绕组的作用是产生感应电动势和通过电流产生电磁转矩，实现机-电能量转换。它是直流电机的主要电路部分。电枢绕组通常都用圆形或矩形截面的导线绕制而成，再按一定规律嵌放在电枢槽内。上下层之间以及电枢绕组与铁芯之间都要妥善地绝缘。为了防止离心力将绕组甩出槽外，槽口处需用槽楔将绕组压紧，伸出槽外的绕组端接部分用无纬玻璃丝带绑紧。绕组端头则按一定规则嵌放在换向器铜片的升高片槽内，并用锡焊或氩弧焊焊牢。

## 4) 换向器

换向器的作用是机械变流实现换向，即在直流电动机中，它将外加的直流电流转换为绕组内的交流电流；在直流发电机中，它将绕组内的交流电动势转换为电刷端的直流电动势。

换向器的结构如图 1-13 所示。换向器由许多换向片组成，换向片间用云母片绝缘。换向片凸起的一端称为升高片，用以与电枢绕组端头相连，换向片下部做成燕尾形，利用换向器套筒、V 形压圈及螺旋压圈将换向片、云母片紧固成一个整体，在换向片与套筒、压圈之间用 V 形云母环绝缘，最后将换向器压装在转轴上。

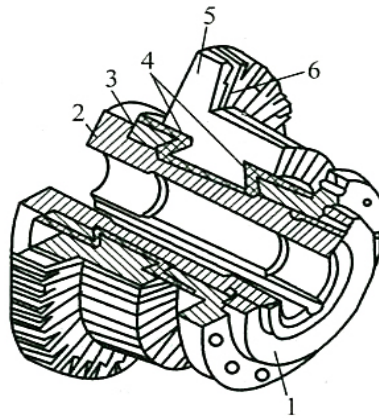


图 1-13 换向器

1—螺旋压圈；2—换向器套筒；3—V形压圈；4—V形云母环；5—换向铜片；6—云母片

此外，在定子的主极靴和转子电枢间的气隙称为空气隙，空气隙既能保证电机转动，又是磁路的重要组成部分。由于空气隙磁阻远大于铁芯磁阻，而电机的能量转换是依靠气隙磁通作为媒介进行的，所以气隙的大小和形状对电机的性能有很大影响。

直流电机的气隙是不均匀的。极靴中部气隙较小，两侧气隙逐渐增大，极尖处气隙最大。小型电机气隙为 1~3 mm；大型电机气隙为 10~12 mm。

## 二、直流电机的型号和额定值

### 1. 直流电机的型号

每一台电机都有一块铭牌，上面标注各种额定数据，简要地介绍这台电机的型号、规格、性能，是用户合理选择和正确使用电机的依据。

国产电机型号依据国标 GB4831-84 规定，一般采用大写的汉语拼音字母和阿拉伯数字表示，其格式为：第一部分用大写的拼音字母表示产品代号，例如 Z 表示直流电动机，ZLC 表示串励直流电动机，ZF 表示直流发电机；第二部分用阿拉伯数字表示设计序号；第三部分用阿拉伯数字表示机座代号；第四部分用阿拉伯数字表示电枢铁芯长度代号。

Z2 系列小型直流电机为中华人民共和国机械工业部 JB1104-68 部颁标准所规定的标准系列小型直流电机，Z2 系列小型直流电机共分 11 个机座号，每个机座号有两种铁芯长度。

型号含义：Z 表示“直”流，2 表示第二次全国定型设计；横线后数字表示机座号与铁芯长短，例如 Z2-11 中前一个 1 代表 1 号机座，后一个 1 代表短铁芯；而 Z2-112 中 11 代表 11 号机座，2 代表长铁芯。

此外，还有 Z3、Z4 系列及其他种类繁多的直流电机，其型号标注各有区别。

### 2. 直流电机额定值

根据国家标准要求设计和试验所得的一组反映电机性能的主要数据，称为电机的额定值。

(1) 额定电压  $U_N$ ：电机安全工作时，电枢绕组允许输出的最高电压或外加电压，单位为伏 (V)。

(2) 额定电流  $I_N$ ：电机按照规定的工作方式运行时，电枢绕组允许流过的最大安全电流，单位为安 (A)。

(3) 额定功率  $P_N$ ：指电机按规定的工作方式运行时，所能提供的输出功率。发电机额定功率是指电枢两出线端输出的电功率；电动机额定功率是指电动机轴上输出的机械功率，单位为千瓦 (kW)。额定功率、额定电压和额定电流的关系为：

$$\text{发电机：} \quad P = U_N I_N \quad (1-3)$$

$$\text{电动机：} \quad P = U_N I_N \eta_N \quad (1-4)$$

式中  $\eta_N$ ——额定效率

(4) 额定转速  $n_N$ ：电机在额定电压、额定电流和额定输出功率时，电机的旋转速度，单位为转/分 (r/min)。

此外，还有工作方式、励磁方式、额定励磁电压、额定温升、额定效率等。

额定值是选用或使用电机的主要依据，一般希望电机按额定值运行。但实际上，电机运行时的各种数据可能与额定值不同，它们由负载的大小来确定。若电机的电流正好等于额定值，则称为满载运行；若电机的电流超过额定值，则称为过载运行；若电机的电流比额定值小得多，则称为轻载运行。长期过载运行将使电机过热，降低电机寿命甚至损坏电机；长期轻载运行，使电机的容量不能充分利用。这两种情况都将降低电机的效率，都是不经济的。故在选择电机时，应根据负载的要求，尽可能使电机运行在额定值附近。

【例 1-1】 直流发电机： $P_N = 10 \text{ kW}$ ， $U_N = 230 \text{ V}$ ， $n_N = 1000 \text{ r/min}$ ， $\eta_N = 80\%$ 。求额定输入功率及额定电流。

【解】

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{10}{0.8} = 12.5 \text{ (kW)}$$

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{10 \times 10^3}{230} = 43.5 \text{ (A)}$$